

5. Эфрон Л.И. Термомеханическая прокатка как способ получения высокоэффективных высокопрочных сталей для труб большого диаметра / Л.И. Эфрон // Сборник докладов Междунар. научно-технической конф. «Прогрессивные толстолистовые стали для газонефтепроводных труб большого диаметра и металлоконструкций ответственного назначения» / Азовсталь. – Мариуполь, 2002. С. 42-44.
6. Ткаченко И.Ф. Многоцелевая оптимизация технологии термического упрочнения проката высокопрочных свариваемых сталей с использованием компьютерной технологии “Data Mining” / И.Ф.Ткаченко // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб.наук.праць.-Маріуполь.-2004.- №14.-С.111-117.
7. Декларацийний патент на винахід №71819 А 7G01N3/00. Спосіб визначення схильності металевих матеріалів до окрихчування / І.Ф.Ткаченко, К.І.Ткаченко (Україна).-20031212811. Заявл. 29.12.2003. Надр.15.12.2004, Бюл.№12.-3 с.

Рецензент: Л.С.Малінов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.03.2011

УДК 691.87:691.714:539.434

Вакуленко И. А.¹

ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ОТ РАЗМЕРА СТРУКТУРНОГО ЭЛЕМЕНТА СТАЛИ

Вакуленко И.А. Оценка зависимости усталостной прочности от размера структурного элемента стали. В статье показано, что рост усталостной прочности стали при уменьшении размера зерна и толщины ферритного промежутка в перлите объясняется сдвигом в область повышенных суммарных деформаций момента распада однородного распределения дислокаций в феррите на периодические структуры.

Ключевые слова: размер зерна феррита, толщина ферритного промежутка перлита, дислокационная ячеистая структура, усталостная прочность, плотность дислокаций.

Вакуленко И.О. Оцінка залежності міцності при втомі від розміру структурного елемента сталі. В статті показано, що підвищення межі міцності при втомі сталі за рахунок зменшення розміру зерна та товщини феритного проміжку в перліті пояснюється зсувом в область підвищених сумарних деформацій моменту розпаду однорідного розподілу дислокацій в фериті на структури з визначеною періодичністю.

Ключові слова: розмір зерна фериту, товщина феритного проміжку перліту, дислокаційна чарункова структура, міцність при втомі, густина дислокацій.

I.O. Vakulenko. The estimate strength of fatigue steel to be result variation of structure element. It is shown that increase of fatigue strength of middle carbon steel resulted by decreasing of grain size and distance between carbides particles can be attributed to the nucleation of mobile dislocation and to forming of dislocation cell structure.

Key words: grain size of ferrite, distance between particles in pearlite, dislocation cell structure, strength of fatigue, density of dislocation.

Постановка проблемы и анализ известных публикаций. Известно, что с ростом содержания углерода в стали роль основного структурного элемента постепенно переходит от размера зерна феррита к расстоянию между пластинами цементита перлитной колонии [1].

¹ д-р. техн. наук, профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск

Диспергирование структурных составляющих сопровождается неизбежным ростом прочностных характеристик независимо от направления нагружения [2]. Зависимости сопротивления распространению пластической деформации как при статическом, так и циклическом нагружении описывают однотипным уравнением (Холла–Петча) [1,2]:

$$\sigma_T(\sigma_{-1}) = \sigma_i(\sigma_i') + k_y(k_y') \cdot d^{-0,5}, \quad (1)$$

где σ_{-1} - предел прочности при усталости, и σ_i, k_y - постоянные параметры, которые определяют из анализа зависимости предела текучести (σ_T) при статическом однонаправленном нагружении в зависимости от размера зерна феррита (d).

Величины σ_i' та k_y' аналогичны тем, которые определяют для условий статического нагружения, но относятся для зависимости σ_{-1} от d .

Область однородного деформационного упрочнения при нагружении достаточно часто описывают с использованием соотношения [1]:

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \varepsilon^m, \quad (2)$$

где σ и ε соответственно истинные напряжение и деформация, K - постоянная, m - коэффициент деформационного упрочнения, σ_0 - величина напряжения необратимого перемещения дислокаций.

Оценку способности металла к деформационному упрочнению осуществляют используя соотношение (2), после его преобразования:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{(\sigma - \sigma_0) \cdot m}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – скорость деформационного упрочнения.

Указанная характеристика позволяет оценить увеличение плотности дислокаций в процессе деформирования металла в области однородного деформационного упрочнения [2]. С учетом того, что на начальных этапах деформирования в зависимости от схемы нагружения (однонаправленное статическое или знакопеременное циклическое) отмечается различный темп накопления дефектов кристаллического строения, неизбежны различия и в формировании дислокационных субструктурных образований в виде ячеек разной степени совершенства [1,2].

Цель работы. Объяснение особенностей поведения углеродистой стали с различным размером структурного элемента при циклическом нагружении.

Материал и методики исследований. Материалом для исследования служили углеродистые стали с содержанием углерода 0,1 и 0,65 %. Размер зерна феррита и дисперсность перлита изменяли за счет различных термомеханических обработок. Из анализа кривых нагружения сталей определяли параметры деформационного упрочнения, величину напряжения необратимого перемещения дислокаций. Исследование поведения металла при усталости осуществляли при изгибе с использованием машины «Сатурн–10» при симметричном цикле нагружения. Величину размера структурного элемента стали определяли, используя методики количественной металлографии [3].

Изложение основного материала. Сравнительный анализ поведения низкоуглеродистых сталей при статическом растяжении и знакопеременном нагружении указывает на существование как значительного подобия, так и определенных различий. Из представленных зависимостей пределов текучести и усталости от размера зерна феррита (рис. 1) следует, что как σ_T так и σ_{-1} достаточно однозначно подчиняются зависимости типа (1). С другой стороны, только для σ_i и σ_i' наблюдаются приблизительно одинаковые абсолютные значения, в то время как для k_y и k_y' различие может достигать до двух раз. На основании этого становится очевидным, что уровень значений сопротивления большеугловой границы зерна феррита распространяющемуся течению при реверсивном нагружении значительно ниже по сравнению с однонаправленным деформированием. Увеличение степени пластической деформации сопровождается (при неизменности ее направления) снижением абсолютных значений. Аналогичное по характеру влия-

ние наблюдается и при изменении знака нагружения – величина k'_y снижается [4]. По сравнению с k_y , изменение величин σ'_i и σ_i несколько иное. Так, при повышении степени деформации однонаправленного нагружения σ_i возрастает и может превышать величину недеформированного состояния в несколько раз. При реверсивном же нагружении, наоборот, величина σ'_i независимо от степени предварительной деформации остается практически неизменной [2]. Учитывая, что при реверсивном деформировании формирующаяся на начальных этапах течения металла дислокационная структура будет оказывать определяющее влияние на характер поведения металла вплоть до момента разрушения, рассмотрим более детально ее качественные изменения. Одним из указанных проявлений можно считать начало распада однородного распределения дислокаций на периодические структуры.

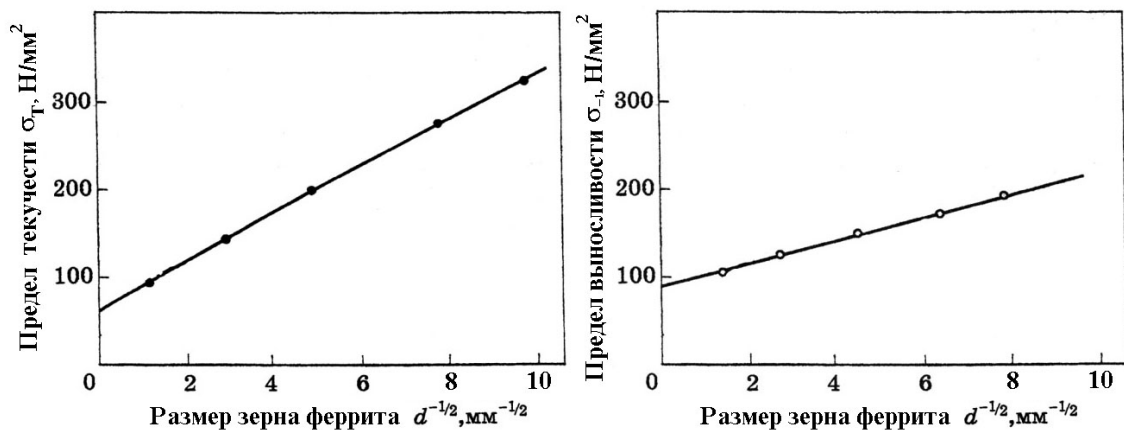


Рис. 1 – Влияние размера зерна феррита на σ_T при статическом растяжении (а) и на σ_{-1} (б) низкоуглеродистой стали

Действительно, как показано в [5,6], момент формирования неоднородностей в дислокационном распределении в значительной степени зависит от размера зерна феррита и толщины ферритного промежутка перлитной колонии. По сравнению с однонаправленным нагружением, для которого рост размера зерна феррита сопровождается сдвигом момента распада равномерного распределения дислокаций на периодические структуры в сторону меньших деформаций [6], изменение направления деформации приводит к качественно иному эффекту. За счет смены этапов упрочнения и разупрочнения металла и связанных с ними процессами аннигиляции дислокаций в отдельных объемах зерна феррита (вблизи границ зерна и в его середине) в крупных зернах феррита быстрее достигаются условия распада равномерного распределения дислокаций на структуры с определенной периодичностью. Подтверждением приведенного положения могут служить результаты исследования степени совершенства дислокационной ячеистой структуры холоднотемпературно деформированной низкоуглеродистой стали после знакопеременного нагружения. Так, после холодной пластической деформации прокаткой на 20 % в стали с 0,1 % С была сформирована несовершенная дислокационная ячеистая структура феррита (рис. 2а).

Об этом свидетельствуют достаточно широкие субграницы, в которых наблюдается относительно низкая плотность дислокаций с одновременным присутствием в теле самих ячеек определенного количества несвязанных дислокаций. После четырех циклов знакопеременного изгиба в ячеистой структуре холоднотемпературно деформированной стали отмечается появление свидетельств о развитии процессов их совершенствования. Приведенное положение подтверждается наблюдаемым снижением накопленной общей плотности дислокаций [2] с одновременным уменьшением ширины субграниц и частичной очисткой тела ячеек от несвязанных дислокаций (рис. 2б).

Для сталей с высоким содержанием углерода формирование дислокационной ячеистой структуры в перлитной колонии будет неизбежно зависеть от темпа прироста плотности дислокаций в ферритном промежутке и ее последующего распределения.

Как показано в [1], повышение дисперсности перлита сопровождается снижением темпа накопления дислокаций и сдвигом начала формирования немонотонностей в их распределении в сторону больших деформаций.

Подтверждается это приростом максимально возможной вытяжки при волочении высокоуглеродистой стали с уменьшением размера ферритного промежутка перлитной колонии [2], что объясняется формированием и изменениями дислокационной ячеистой структуры в процессе деформации.

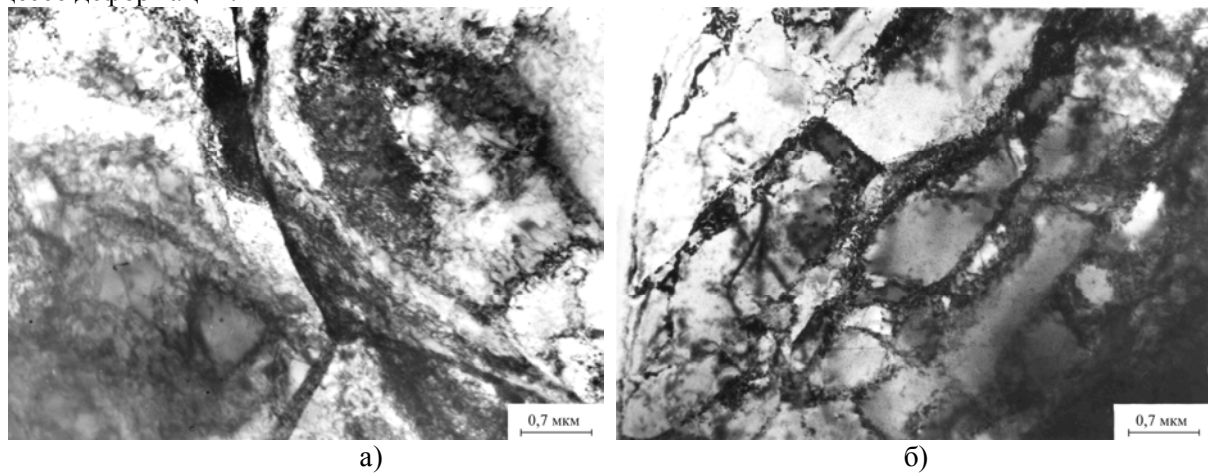


Рис.2. - Дислокационная структура феррита низкоуглеродистой стали после 20 % пластической деформации прокаткой (а) и после последующих четырех циклов знакопеременного изгиба (б)

На основании этого при усталостном нагружении средне- и высокоуглеродистых сталей диспергирование перлитной составляющей структуры должно дополнительно повышать сопротивление металла зарождению очагов разрушения. Так, с уменьшением толщины ферритного промежутка перлитной колонии (λ) наблюдается прирост усталостной прочности, при этом характер зависимости (рис. 3а) подчиняется соотношению типа (1):

$$\sigma_{-1} = \sigma'_i + k'_y \cdot \lambda^{-0,5}, \quad (4)$$

где σ'_i и k'_y - параметры аналогичные соотношению (1).

Сравнительный анализ абсолютных значений параметров уравнения (4), с аналогичными для статического нагружения показывает хорошее совпадение, как и в случае низкоуглеродистой стали от d для σ_i и σ'_i при том, что k_y также превышает k'_y .

Приведенное различие в значениях k'_y и k_y обусловлено несколькими факторами, основные из которых это состояние границ раздела и особенности структурных изменений вблизи них. Так, развитие процессов аннигиляции дислокаций при изменении знака нагружения приводит к неизбежному снижению темпа накопления дислокаций, с одновременными изменениями самой ячеистой структуры (рис. 4).

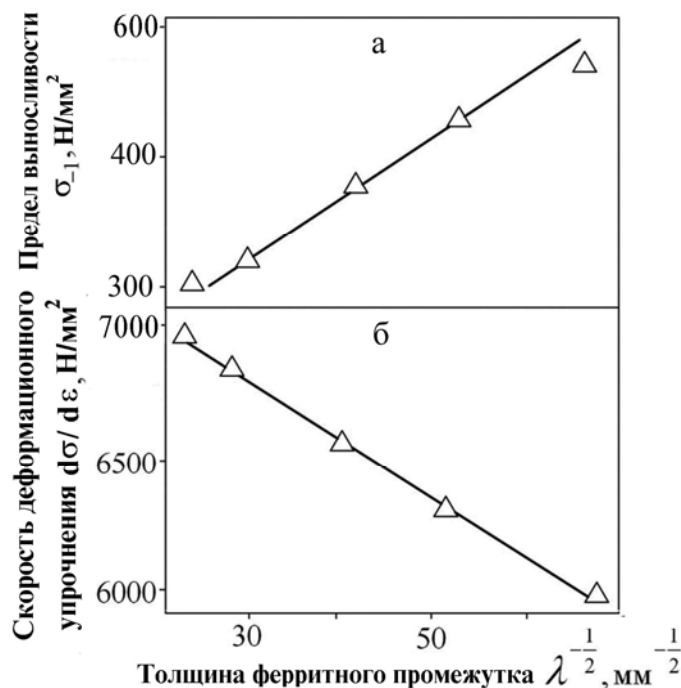


Рис. 3 - Влияние λ на σ_{-1} (а) и скорость деформационного упрочнения (б) стали с 0,65 % С

Действительно, как следует из анализа приведенных структур, в ферритных промежутках перлита холоднодеформированной стали при определенном накопленном количестве дислокаций уже наблюдается формирование немонотонностей в их распределении (рис. 4а). После нескольких циклов знакопеременного изгиба можно наблюдать участки перлитных колоний с

существенно пониженной плотностью дислокаций и относительно равномерным их распределением (рис. 4б). Следовательно, изменение знака нагружения сопровождается не только снижением общей накопленной плотности дислокаций, но и ростом равномерности распределения дислокаций в феррите перлита, что неизбежно сдвигает момент формирования очагов первых субмикротрещин в область больших суммарных деформаций при циклическом нагружении.

Таким образом, для низкоуглеродистой стали наблюдаемое снижение σ_{-1} с ростом d связано с ускорением процесса распада однородного распределения дислокаций на периодические структуры и последующего их совершенствования. Для перлитных структур диспергирование сопровождается одновременным уменьшением толщины цементитной составляющей и ферритного промежутка колонии. Уменьшение толщины ферритной прослойки приводит к снижению длины свободного пробега дислокаций, а, следовательно, и к уменьшению вероятности их блокирования до момента выхода на межфазную поверхность. При этом более тонкие пластины цементита способны выдерживать большие пластические деформации (изгиб пластин, рис. 4б) без формирования трещин. Следовательно, для перлитных структур указанное одновременное влияние способствует своеобразной стабилизации структуры, сдвигая момент формирования неоднородностей в распределении дислокаций в сторону больших суммарных деформаций.

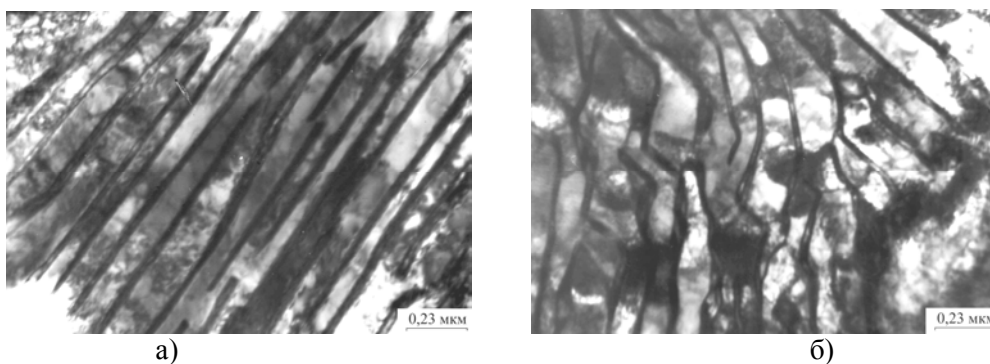


Рис.4. - Распределение дислокаций в ферритных промежутках перлитных колоний углеродистой стали после холодной деформации 20 % (а) и последующих четырех циклов знакопеременного изгиба (б)

Выводы

1. Снижение σ_{-1} низкоуглеродистой стали с увеличением d обусловлено одновременно ускорением процесса формирования дислокационных ячеистых структур и снижением способности к аннигиляции вводимых дефектов кристаллического строения.
2. Для среднеуглеродистой стали увеличение σ_{-1} при диспергировании перлитной колонии связано с уменьшением длины свободного пробега дислокаций и сдвигом момента формирования немонотонностей в дислокационном распределении в сторону большего числа циклов нагружения.

Список использованных источников:

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. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И.А. Вакуленко, В.И. Большаков. – Днепропетровск: Маковецкий, 2008. – 196 с.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография / С.А.Салтыков. – М.: Металлургиздат, 1958. – 446 с.
4. Вакуленко И.А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании / И.А. Вакуленко. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2003. – 94 с.
5. Garofalo F. Factors affecting the propagation of a Luders band and lower yield stress in iron / F.Garofalo // Met. Trans. – 1971. - V.2. - № 8. - P. 2315-2317.
6. Holt D. Dislocation cell formation in metals / D.Holt // Journal applied physics. – 1970. - V.41. - №8. - P.3197-3202.

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 10.03.2011