

УДК 669.017.539.43

Канд. техн. наук А. Б. Максимов

Государственный морской технологический университет, г. Керчь

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИМ ИЗГИБОМ

*Предложена и рассчитана модель упрочнения при циклическом пластическом изгибе толстолистового проката из низколегированных сталей.*

**Ключевые слова:** упрочнение, циклический изгиб, пластическая деформация, низколегированные стали, предел текучести, твердость.

### Введение

Исследования влияния пластической деформации циклическим изгибом в холодном состоянии представлены в работах [1, 2]. При холодной пластической деформации изгибом прочностные свойства сталей возрастают на (30÷40) % при удовлетворительном уровне относительного удлинения и ударной вязкости. При пластическом изгибе плоского образца распределение деформации по толщине имеет неравномерный характер. При циклическом воздействии изгиба происходит неравномерное упрочнение металла по толщине образца. В литературе отсутствуют модели, описывающие упрочнение образца при неравномерном распределении деформации по его сечению.

В ряде работ [3, 4] исследовано изменения тонкой структуры стали при пластическом деформировании изгибом. Так как при изгибе происходит неравномерное распределение деформации по сечению образца, то послойное исследование показало [5], что кинетика изменения дислокационной структуры по всем слоям одинаковая: вначале происходит увеличение плотности дислокаций, затем образование ячеистой структуры, а потом – полосовой. Интенсивность протекания и полнота этих процессов возрастает от центра к поверхности. Обнаружено изменение дислокационной структуры в середине образца, что согласуется с данными работ [6, 7].

Вследствие того, что при пластическом изгибе происходит неравномерное упрочнение металла по толщине, то целью настоящей работы является интегрально оценить прочностные свойства стали по всей толщине в зависимости от толщины образца и числа циклов изгиба.

### Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использовалась толстолистовая сталь марок 09Г2 и 10Г2С1. Образцы из указанных марок размером 8×15×230 мм вырезали

из листов толщиной 8 мм поперек направления прокатки и подвергали нормализации или отжигу по стандартным режимам для данных марок сталей. Термообработанные образцы подвергали циклическому изгибу по жесткой схеме нагружения с амплитудой деформации 2; 5,5; 8 и 12 % при комнатной температуре. Твердость по сечению деформированных образцов измеряли по методу Бринеля на твердомере ТП-2 по ГОСТу 9450-76.

### Анализ полученных результатов

На рис. 1 представлено изменение твердости по толщине образца и от числа циклов изгиба. Из приведенных данных видно, что твердость по сечению возрастает от центра образца к поверхности. Кроме того, твердость центрального слоя образца возрастает. Возрастание твердости от центра образца к поверхности обусловлено неравномерным распределением деформации образца при изгибе.

Необходимо отметить, что характер распределения твердости по сечению в рассматриваемом интервале степени разовой деформации практически постоянный. Дальнейшее увеличение твердости происходит за счет увеличения циклов изгиба. Причем твердость центрального слоя также возрастает. Механизм повышения твердости образца в центральной части рассмотрен в работе [4].

Анализ полученных данных показывает, что при холодной деформации твердость ( $H_V$ ) по сечению можно описать зависимостью вида

$$H_V = Ax^n + BN^m + H_{VO}, \quad (1)$$

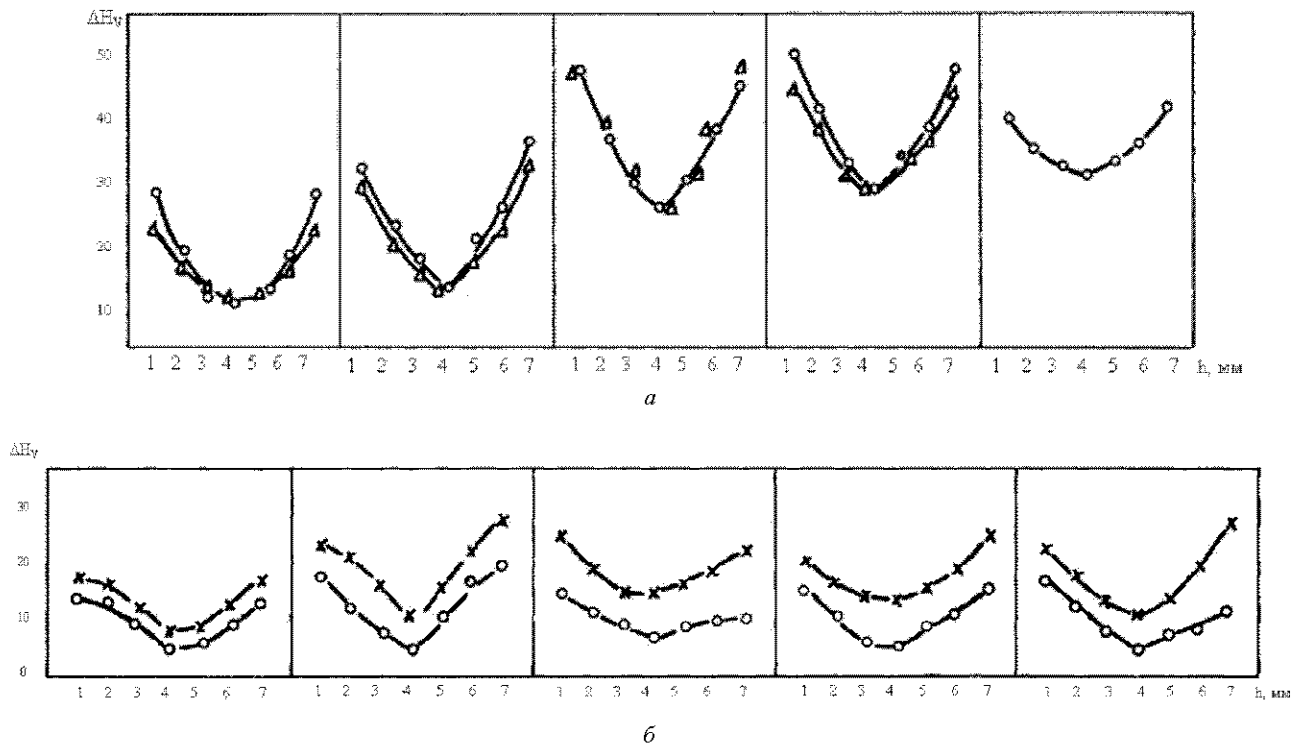
где  $A$  и  $B$  – постоянные, зависящие от марки стали,

$n$  и  $m$  – постоянные, при чем  $n > 1$ ;  $m < 1$ ;

$x$  – расстояние от центра до рассматриваемого слоя по толщине образца.

$$\text{Обозначим: } Ax^n = \Delta H_{Vh}; \quad (2)$$

$$BN^m = \Delta H_{VN}; \quad (3)$$



**Рис. 1.** Рис. 1. Изменение твердости по толщине образца при циклическом изгибе:

*a* – для отожженной стали 09Г2 со степенями разовой деформации 8 % (0) и 12 % (Δ);  
*б* – для нормализованной стали 10Г2С1 со степенью разовой деформации 5,5 % (x) и 2 % (0)

$\Delta H_{vh}$  – изменение твердости, связанное с неравномерным распределением деформации по сечению при изгибе;

$\Delta H_{vN}$  – изменение твердости, связанное с числом циклов изгиба.

Для стали 09Г2 в отожженном состоянии уравнение (2) примет вид

$$\Delta H_{Vh} = 1,3x^{2,3}. \quad (4)$$

Так как между твердостью ( $H_V$ ) и пределом текучести ( $\sigma_T$ ) существует прямопропорциональная зависимость, то:

$$\sigma_T = C \cdot H_V, \quad (5)$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда изменение предела текучести ( $\sigma_{Th}$ ) от толщины образца будет описываться выражением:

$$\sigma_{Th} = 1,3Cx^{2,3} + \sigma_0, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  – предел текучести материала в исходном состоянии.

Рассмотрим плоский образец на растяжение с площадью поперечного сечения  $S$ , равной произведению толщины  $h$  на ширину  $a$ , продеформированный циклическим пластическим изгибом. Пусть к образцу приложена растягивающая сила  $F$  (рис. 2). Вследствие неравномерной деформации по сечению образца при изгибе происходит неравномерное упрочнение, поэтому предел текучести материала будет изменяться по

сечению по зависимости (6). На этом же рисунке представлена эпюра распределения предела текучести по сечению образца толщиной  $h$ . Выделим в сечении образца элементарный слой толщиной  $dx$  с пределом текучести  $\sigma_T$ . При приложении внешней растягивающей силы  $F$  на элементарный слой действует сила  $dF$ , равная:

$$dF_i = a \cdot \sigma_{iT} \cdot dx, \quad (7).$$



**Рис. 2.** Эпюра распределения предела текучести по сечению образца. Обозначения по тексту

Тогда сила, вызывающая текучесть материала образца будет

$$F_T = a \int_{-p/2}^{h/2} \sigma_{Th} dx F_T. \quad (8)$$

Для стали 09Г2 в отожженном состоянии получим:

$$F_T = ac \int_{-p/2}^{h/2} (1,3x^{2,3} + H_{VO}) dx. \quad (9)$$

Тогда предел текучести образца с неравномерным распределением предела текучести по толщине  $\sigma_{Th}$  будет:

$$\sigma_{Th} = \frac{F_T}{ah}. \quad (10)$$

Вычисляя выражение (9) и подставляя в уравнение (10), получим:

$$\sigma_{Th} = 0,08ch^{2,3} + \sigma_0. \quad (11)$$

Выражение (3) для стали 09Г2 в отожженном состоянии можно представить в виде:

$$\Delta H_{VN} = 8,1 \cdot N^{0,74}. \quad (12)$$

Тогда повышение предела текучести, связанное с числом циклов изгиба  $\Delta\sigma_{TN}$  будет:

$$\Delta\sigma_{TN} = 8,1 \cdot C \cdot N^{0,74}. \quad (13)$$

Учитывая отношение (5), общая зависимость предела текучести в зависимости от толщины образца и числа циклов изгиба имеет вид:

$$\sigma_T = (Ax^n + BN^m) \cdot C + \sigma_0. \quad (14)$$

Подставляя в уравнение (14) выражения (11) и (13), получим:

$$\sigma_T = (0,08 \cdot h^{2,3} + 8,1N^{0,74}) \cdot C + \sigma_{TO}. \quad (15)$$

Уравнение (15) позволяет определить предел текучести стали 09Г2 при деформировании циклическим изгибом в холодном состоянии со степенью разовой деформации 5,5 % в зависимости от числа циклов изгиба.

При циклической деформации (в данном случае по симметричному циклу жесткой схемы нагружения) происходит периодически упрочнение и разупрочнение материала. Кроме того, по данным работы [5] для низколегированных сталей сопротивление сжатию меньше сопротивления растяжению приблизительно на 40 %. Поэтому при циклической деформации не происходит аддитивного сложения степени разовой деформации. На рис. 3 представлена схема упрочнения низколегированной стали за один цикл деформации при жесткой схеме нагружения по симметричному циклу. Для упрощения рассмотрим равномерное распределение деформации по сечению образца, т. е.

то, что имеет место при одноосном растяжении или сжатии.

На участке I (рис. 3) образец деформируется растяжением до некоторой деформации  $\epsilon_a$  (степень разовой деформации). Упрочнение металла определяется кривой OA. Это соответствует первой четверти цикла (0,25 цикла).

Во второй четверти цикла на участке II (0,5 цикла) происходит деформация сжатия в противоположную сторону до исходного состояния. Упрочнение металла проходит по кривой AB, которая расположена ниже, чем продолжение кривой OA (линия 1) вследствие эффекта Баушингера.

На участке III (третья четверть цикла или 0,75 цикла) продолжается деформация сжатия до значения  $(-\epsilon_a)$ . Упрочнение проходит по кривой BC, которая расположена ниже продолжения кривой AB (линия 2).

На участке IV (последняя четверть цикла или 1 цикл) происходит растяжение до исходного состояния. В этом случае упрочнение идет по кривой CD, расположенной ниже продолжения кривой BC (линия 3).

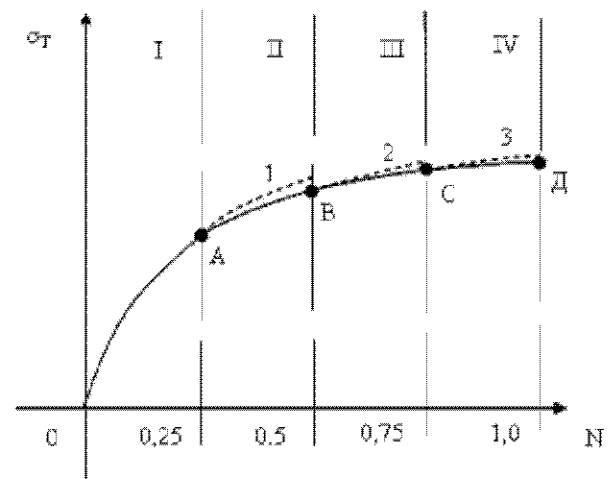


Рис. 3. Схема упрочнения стали при циклической деформации за один цикл:

- - - упрочнение при монотонной деформации;
  - упрочнение при смене направления нагрузки.
- Остальные обозначения по тексту

Таким образом, фактическое упрочнение при циклической деформации получается меньше, чем при односторонней деформации. Это связано с явлением Баушингера и тем, что сопротивление растяжению больше, чем сопротивление сжатия.

С увеличением числа циклов деформации происходит транслирование рассмотренной схемы.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Теоретически получена формула, определяющая предел текучести стального образца при известном характере распределения прочности по сечению образца.

2. Получены эмпирические зависимости, связывающие предел текучести с толщиной образца и количеством циклов деформирования.

3. Предложена схема упрочнения стали при циклической деформации.

#### Список литературы

1. Подгайский М. С. Влияние циклической деформации знакопеременным изгибом на механические свойства низколегированных сталей в зависимости от исходного структурного состояния / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов // Термическая и термомеханическая обработка проката. – М. : Metallurgia. – 1981. – С. 25–27.
2. Подгайский М. С. Упрочнение листовой стали при деформации циклическим изгибом / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов // Повышение эффективности производства толстолистового проката. – М. : Metallurgia. – 1984. – С. 79–81.
3. Долженков Ф. Е. Применение пластической деформации циклическим изгибом как элемента упрочняющей термомеханической обработки листового проката из сталей / Ф. Е. Долженков, М. С. Подгайский, А. Б. Максимов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 4. – С. 156–158.
4. Подгайский М. С. Упрочнение стали 10Г2С1 в зависимости от температуры деформирования циклическим изгибом / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов, Т. М. Наливайченко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1985. – № 6. – С. 54–56.
5. Подгайский М. С. Пластическое деформирование при циклическом знакопеременном изгибе / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов, Т. М. Наливайченко // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – № 1. – С. 115–116.
6. Подгайский М. С. Влияние деформации циклическим изгибом на дислокационную структуру стали 10Г2С1 / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов, Ю. П. Нескуб // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 4. – С. 131–133.
7. Подгайский М. С. Субструктура и механические свойства стали 10Г2С1 после теплового и горячего деформирования циклическим изгибом / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов, Ю. П. Нескуб // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1985. – № 6. – С. 29–31.

Одержано 25.10.2011

**Максимов О.Б. Розробка моделі зміцнення низьколегованої сталі при пластичній деформації циклічним вигином**

*Запропоновано і розраховано модель зміцнення при циклічному пластичному вигині товстолистового прокату з низьколегованих сталей.*

**Ключові слова:** зміцнення, пластична деформація, низьколеговані сталі, прибудова текучості, твердість.

**Maximov A. Development of low-alloy steel strengthening model during plastic deformation in cyclic bend**

*Model of hardening under cyclic plastic bending of low-alloy steels rolled plates was proposed and calculated.*

**Key words:** work-hardening, cyclic bend, plastic deformations, low-alloy steel, yield point, hardness.

---