

**И.А. Вакуленко, О.А. Чайковский, Д.В. Лошкарёв, В.В. Ильюшенко**

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА ФЕРРИТА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ НАГРУЖЕНИЯ.**

На примере низкоуглеродистой тонколистовой горячекатаной стали показано, что при деформировании растяжением скорость распространения звуковых колебаний резко снижается до уровня напряжений в 2–2,5 раза меньше предела текучести, затем указанная характеристика меняется незначительно. Момент изменения характера зависимости скорости распространения звука в металле при нагружении связан с началом массового размножения дислокаций.

Развитие автоматизированных систем управления производственными процессами требует усовершенствования методов оценки и повышения точности измерения уровня свойств материалов, необходимых для своевременного уточнения определенных технологических характеристик. Для указанных целей широкое применение находят методы неразрушающего контроля свойств металлов и сплавов, такие как акустические, ультразвуковые [1], магнитные и т.д.

Известные акустические методы исследования свойств сталей основаны на измерении скорости распространения звуковых колебаний [2], обладают определенной чувствительностью к изменению структурных характеристик, плотности дефектов кристаллического строения, химического состава [3]. Учитывая, что значительная доля проката, используемого в металлических конструкциях, испытывает нагрузки значительно ниже предела текучести, представляет интерес исследовать изменение скорости распространения звуковых колебаний в области упругих и малых пластических деформаций.

Целью настоящей работы явилась оценка изменения скорости распространения звуковых колебаний в области упругих и малых пластических деформаций при нагружении низкоуглеродистой стали.

Материалом для исследования служила низкоуглеродистая горячекатаная листовая сталь 08кп толщиной 1,5мм производства меткомбината «Запорожсталь» с химическим составом: 0,06%C; 0,71%Mn; 0,28%Si; 0,028%S; 0,017%P; 0,04%Cr. Структурные характеристики определяли с использованием методик количественной металлографии. Испытания на растяжение осуществляли на машине FP–100 с записью диаграммы деформирования. Скорость деформации составляла  $10^{-3}\text{с}^{-1}$ . Скорость распространения звуковых колебаний измеряли прибором ИПС–12 с частотой 1024 Гц. После достижения устойчивой автоциркуляции звуковых импульсов и определения

длительности прохождения импульса от излучателя до приемника, получали скорость распространения звуковых колебаний.

Анализ кривых растяжения образцов листового проката показал практически одинаковый вид диаграмм растяжения (рис.1), особенно в области малых пластических деформаций. Параллельное определение скорости распространения звуковых колебаний в зависимости от уровня нагружения, иллюстрирует меньшее подобие (рис.2). Действительно, если до испытания на растяжение скорость распространения звуковых колебаний в зависимости от ориентации относительно направления прокатки: вдоль направления прокатки ( $V_{вп}$ ) и поперек прокатки ( $V_{пп}$ ), между образцами менялась незначительно (менее 0,2%), то даже небольшое начальное нагружение сопровождалось различной скоростью снижения указанных характеристик. Так, после нагружения до уровня результирующего напряжения порядка  $16 \text{ Н/мм}^2$ ,  $V_{вп}$  в первом образце снизилась с  $2970 \text{ м/с}$  до  $2950 \text{ м/с}$ , в то же время другой образец показал снижение указанной характеристики от  $2960$  до  $2800 \text{ м/с}$ . Образец, обозначенный под номером 3, занимает промежуточное положение между первыми двумя (рис.2).

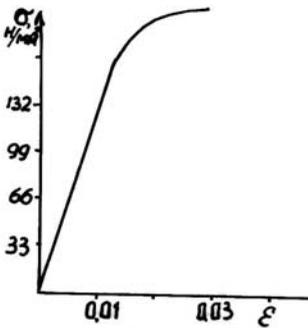


Рис. 1. Диаграмма растяжения листовой стали 08кп толщиной 1,5мм

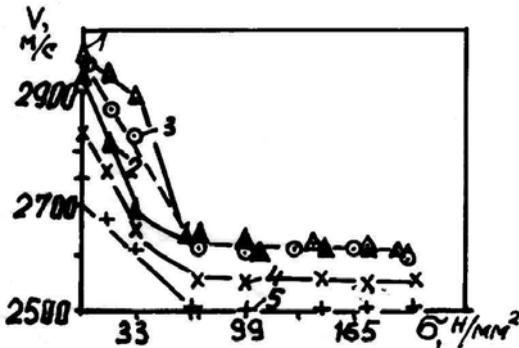


Рис. 2. Зависимость скорости распространения звуковых колебаний ( $V_{вп}$ –1,2,3;  $V_{пп}$  – 4.5) от прилагаемого напряжения при растяжении.

Дальнейшее повышение текущего значения напряжения сопровождается монотонным снижением  $V_{вп}$ . После достижения уровня порядка  $60 \text{ Н/мм}^2$  наблюдается резкий перелом на кривой изменения скорости звуковых колебаний, приводя к уменьшению снижения  $V_{вп}$  более чем на порядок величин. Указанный характер изменения сохраняется неизменным до более высоких напряжений, существенно превышающих условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ). Аналогичным образом меняется величина  $V_{пп}$ : по шкале напряжений момент резкого изменения абсолютных значений совпадает с данными по  $V_{вп}$ .

На основании полученных результатов, в первом приближении, можно говорить о существовании определенного значения напряжения, значительно более низкого уровня, чем предел текучести, при котором наблюдается резкое изменение характера зависимости скорости распространения звуковых колебаний в деформируемом металле.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов воспользуемся анализом структурных изменений, происходящих в металле при деформировании в области микротекучести.

В общем виде параболическая зависимость напряжения ( $\sigma$ ) от деформации ( $\epsilon$ ) описывается соотношением:

$$\sigma = \sigma_0 + K \epsilon^m \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение необратимого движения дислокаций [4],  $K$  – постоянная,  $m$  – коэффициент деформационного упрочнения. В свою очередь величина  $\sigma_0$  является сложной характеристикой, состоящей из нескольких слагаемых:

$$\sigma_0 = \sigma_i'' + \Delta + Ky/\sqrt{2}d + \alpha\mu v \sqrt{\rho_m} \quad (2)$$

где  $\sigma_i''$  – напряжение трения кристаллической решетки,  $\Delta$  – прирост напряжения трения от присутствия атомов внедрения,  $Ky$  – угловой коэффициент, учитывающий вклад от размера зерна ( $d$ ),  $\alpha$  – коэффициент,  $\mu$  – модуль сдвига,  $v$  – вектор Бюргерса,  $\rho_m$  – плотность подвижных дислокаций. Из анализа зависимости  $\sigma_0 - d^{-1/2}$  для исследуемой стали получили, что  $\sigma_i'' = (\sigma_i'' + \Delta)$  составляет значение порядка  $70 \text{ Н/мм}^2$  [5]. Сравнительный анализ абсолютных значений  $\sigma_i$  и напряжения, при котором происходит резкое изменение характера зависимости  $V_{вп}$  ( $V_{пп}$ ) при нагружении, указывает на довольно хорошее совпадение между ними. На основании этого, можно полагать, что основное влияние на изменение скорости распространения звуковых колебаний, наблюдаемое при нагружении металла, происходит при напряжениях, ниже уровня напряжения трения кристаллической решетки. С другой стороны, увеличение размера зерна феррита при неизменном содержании углерода в стали повышает роль твердорастворного упрочнения, т.е. вклад  $\Delta$  в уровень значений напряжения трения кристаллической решетки [4]. На основании этого оценка размера зерна феррита позволит подтвердить правомочность приведенных положений. Учитывая, что структура

горячекатаной низкоуглеродистой стали в основном формируется в результате протекания процессов собирательной рекристаллизации, структурные изменения в поверхностных объемах металла могут быть обусловлены иными движущими силами, чем во внутренних, что неизбежно должно привести к разнотекстурности металла по сечению [5]. Проведенный анализ тонкокристаллического строения стали показал, что в процессе горячей прокатки возникающие напряжения трения в очаге деформации приводят к формированию в поверхностных слоях определенных полос сдвига с другими, чем внутренние объемы кристаллографическими параметрами [6]. Существование рядом друг с другом зерен с текстурными параметрами (110) [001] и низкой взаимной разориентацией приводит к исчезновению границ раздела. Большеугловые границы зерен феррита в этом случае как бы растворяются. Укрупнение ферритной структуры в указанных приповерхностных объемах горячекатаного листового проката происходит по механизму коалесценции [5].

На основании этого горячекатаная листовая сталь толщиной 1,5 мм обладала приповерхностным слоем толщиной до 0,5 мм со средним размером зерна порядка 150–170 мкм, в то время как в середине листа размер зерна составлял значения около 25 мкм (рис. 3).

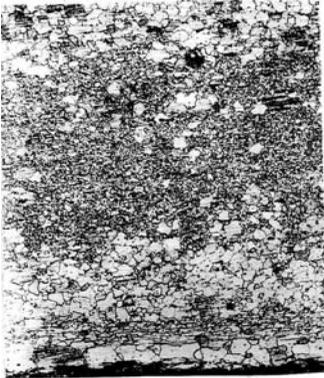


Рис. 3. Структура листовой горячекатаной стали 08кп толщиной 1.5 мм (х 50).

Для области микротекучести согласно [7] величина  $K_y$  из (2) характеризует трудность возбуждения скольжения в соседнем зерне и оценивается соотношением:

$$K_y = \sigma_d \sqrt{L}, \quad (3)$$

где  $\sigma_d$  – напряжение разблокировки дислокаций или напряжение генерации новых дислокаций в приграничной зоне,  $L$  – расстояние от границы зерна до источника дислокаций.

Как следует из [7] в случае когда  $\sigma_d \leq \sigma_i$  создаются условия неодновременности начала движения дислокаций в различных объемах металла, что не позволяет накопить дислокации для формирования фронта полосы деформации. В результате этого на кривой растяжения отсутствует участок прерывистого течения. Учитывая, что листовой прокат обладает определенной структурной неоднородностью, условия зарождения пластического течения в указанных объемах должны быть

различны. Так, для  $d = 150 - 170$  мкм предел текучести равен порядка  $290 \text{ Н/мм}^2$  при  $\sigma_o = 160 \text{ Н/мм}^2$ , подставляя в (3) при  $L \approx \frac{1}{2} d$  получили  $\sigma_d \approx 43 \text{ Н/мм}^2$ , что ниже  $\sigma_i$  ( $70 \text{ Н/мм}^2$ ). Для области с  $d = 25$  мкм,  $\sigma_t = 320 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_o = 220 \text{ Н/мм}^2$   $\sigma_d$  составило значение около  $145 \text{ Н/мм}^2$ , что соответствует условию  $\sigma_d > \sigma_i$ . При анализе характера изменения скорости распространения звуковых колебаний в процессе нагружения фиксируется суммарный эффект от зарождения пластического течения в различных областях металла. Это приводит к появлению для данной стали перелома на кривой изменения  $V$  при  $\sigma \approx 60-70 \text{ Н/мм}^2$ , что примерно соответствует  $\sigma_d$  с учетом долевого влияния объемов металла с различным  $d$ .

На основании полученных результатов можно полагать, что момент резкого изменения скорости распространения звуковых колебаний в процессе нагружения металла, даже в случае значительной структурной неоднородности в первую очередь, обусловлен началом массового размножения дислокаций в области предшествующей микротекучести.

1. *Акустический контроль режимов термообработки алюминиевого сплава В95 / В.В. Муравьев, А.В. Шарко, А.А. Ботаки. – Дефектоскопия, 1980, № 8, С. 48–53.*
2. *Структура и механические свойства монокристаллов гетерофазных сплавов / О.В. Травин, Н.Т. Травина. – М.: Металлургия, 1985, – 184с.*
3. *О влиянии размера зерна феррита объемной доли аустенита на зависимость распространения звуковых колебаний от твердости стали / И.А. Вакуленко, Ю.Л. Надеждин, В.М. Емельянов. – Дефектоскопия, 1993, №7, С. 32–36.*
4. *О связи величины  $\sigma_o$  кривой деформации с параметрами уравнения Холла–Петча / И.А. Вакуленко, В.А. Пирогов, В.К. Бабич. – Металлофизика, 1986, т.8, №6, С.61–64.*
5. *Уменьшение структурной неоднородности горячекатаной листовой стали/ И.А. Вакуленко, С.А. Здоровец, Е.Г. Демина и др. – В сб. Строительство, материаловедение, машиностроение, – Днепропетровск. 2002, вып. 15, ч.1, С. 238–239.*
6. *Формирование структуры в тонколистовой низкоуглеродистой стали / И.А. Вакуленко, Е.Г. Демина, С.А. Здоровец. – Сб. научных трудов. Строительство, материаловедение, машиностроение. 2002, вып. 15, часть 1, С.236–237.*
7. *Cottrell A.H. Theory of brittle fracture in steel and similar metals. – Trans. Met. Soc. AIME, 1958, v.212, p.192–209.*

*Статья рекомендована к печати д.т.н. И.Г.Узловым*