

## ОЦІНКА ВПЛИВУ РОЗМІРУ ЗЕРНА ФЕРИТУ НА ЦИКЛІЧНУ МІЦНІСТЬ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

© Вакуленко І.О., 2010

**Розглянуто залежності межі плинності та міцності при втомі від розміру зерна фериту низьковуглецевої сталі з використанням уявлень стосовно зародження рухомих дислокацій та формування дислокаційних чарункових структур.**

**The observed of yield point and strength stress of fatigue to be the result of a directional variation in the grain size of ferrite to cause nucleation of mobile dislocations and formation dislocation cell structure in low carbon steel.**

**Постановка проблеми.** Враховуючи, що для низьковуглецевих сталей розмір зерна фериту є основним структурним елементом [1, 2], подрібнення зерна супроводжується підвищенням міцності сталі незалежно від напрямку навантаження: односпрямованого або знакозмінного [2]. На основі числових експериментальних досліджень [3–6] зазначено, що характер залежності міцності як за умов статичного навантаження, так і за циклічно змінного напруження описують одним типом рівняння (Холла–Петча):

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

де  $\sigma_{-1}$  – міцність при втомі,  $\sigma_i$  і  $k_y$  – постійні параметри, які визначають з аналізу залежності межі плинності ( $\sigma_T$ ) односпрямованого навантаження від розміру зерна фериту ( $d$ ). Величини  $\sigma'_i$  та  $k'_y$  аналогічні тим, які визначені для статичного навантаження, але належать для залежності  $\sigma_{-1}$  від  $d$ .

Початковим умовам навантаження, коли відбуваються перші акти пластичної деформації, відповідають два типи плинності: за допомогою розповсюдження стрічок Чернова–Людерса, з достатньо великою неоднорідністю розподілу деформації та без наведених стрічок. В останньому випадку на діаграмах навантаження спостерігають повільний перехід від області пружних деформацій до області однорідного деформаційного зміцнення (ОДЗ). З іншого боку, область однорідного деформаційного зміцнення описують із застосуванням співвідношення [4]:

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

де  $\sigma$  і  $\varepsilon$  відповідно – істинні напруження і деформація,  $K$  – постійна,  $m$  – коефіцієнт деформаційного зміцнення,  $\sigma_0$  – величина напруження необерненого переміщення дислокацій. Оцінюють спроможність металу до деформаційного зміцнення, використовуючи співвідношення (2) після його перетворення:

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

де  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  – швидкість деформаційного зміцнення. Наведена характеристика показує збільшення густини дислокацій під час деформування металу в області однорідного деформаційного зміцнення

[4, 5]. З урахуванням того, що на початкових етапах деформування залежно від схеми навантаження (односпрямоване статичне або знакозмінне циклічне) обов'язково повинний бути різний темп накопичення дефектів кристалічної будови та можливі розбіжності в формуванні дислокаційних субструктурних утворень у вигляді чарунок різного ступеня удосконалення, аналіз характеристик деформаційного зміцнення дасть змогу визначити особливості поведінки металу при зміні знаку деформації. Отже, виникає неабиякий інтерес стосовно визначення характеру впливу розміру зерна фериту на поведінку низьковуглецевої сталі в процесі циклічного навантаження.

**Мета роботи.** На основі аналізу умов зародження та поширення пластичної деформації дати пояснення щодо особливостей поведінки низьковуглецевої сталі з різним розміром зерна фериту при циклічному навантаженні.

**Матеріал і методика досліджень.** Матеріалом для досліджень були низьковуглецеві сталі з кількістю вуглецю 0,06 і 0,1 % у вигляді холоднокатаного листового прокату завтовшки 1,2 мм. Різний розмір зерна фериту отримували при зміні співвідношення між температурою відпалу та ступенем холодної пластичної деформації. Аналізуючи хід кривих навантаження досліджуваної сталі визначали параметри деформаційного зміцнення, величину напруження, яке дає змогу оцінити умови зародження пластичної деформації. Досліджували характер поведінки металу при втомі, використовуючи машини «Сатурн–10» при симетричному циклі при згині. Величину розміру зерна фериту визначали з використанням методик кількісної металографії [7].

**Результати досліджень та їх обговорення.** Аналіз кривої навантаження показує, що із збільшенням напруження від величини  $\sigma_0$  (співвідношення 2) до межі плинності в металі вже накопичена визначена кількість дефектів кристалічної будови, причому темп їх приросту істотно залежить від розміру зерна [2–5]. З іншого боку, процес формування дислокаційних структур значною мірою залежить не тільки від структурних параметрів металу, а і від схеми навантаження [3–6]. Так, при односпрямованому розтяганні збільшення діючого напруження на рівні від  $\sigma_0$  до  $\sigma_T$  супроводжується зростанням  $\sigma_i$  та  $k_y$  (співвідношення 1) від 50 до 65 МПа та від 13 до 27,5 Н·мм<sup>-1.5</sup> відповідно. Наведений характер зміни цих параметрів обумовлений впливом зростання густини дислокацій при деформуванні металу на підвищення опору роботі джерелам дислокацій. Одночасно із зростанням необхідного рівня напруження для зародження дислокацій підвищується величина  $k_y$ , яка характеризує ступінь складності подолання дислокаціями границь між зернами фериту [5]. Отже, в процесі навантаження сталі від  $\sigma_0$  до  $\sigma_T$  зростання  $k_y$ , яке зв'язане з підвищенням густини дислокацій, обумовлює умови формування осередку смуги деформації. Другою умовою, яка повинна бути виконана для формування наведеного осередку – це визначене співвідношення між напруженням ковзання кристалічної решітки фериту ( $\sigma_i$ ) та величиною розблокування дислокацій  $\sigma_d$ . Так, для формування осередку смуги Чернова – Людерса має виконуватися нерівність [3]:

$$\sigma_d \geq \sigma_i, \quad (4)$$

де  $\sigma_d = k_y \cdot d^{-0.5}$ . З нерівності (4) випливає, що після досягнення деформуючим напруженням рівня  $\sigma_d$  починається різкий приріст густини рухомих дислокацій ( $\Delta\rho_m$ ), які за рахунок низького опору своєму переміщенню приводять до формування зародка смуги деформації [4, 5]. При цьому виконується співвідношення між локальною швидкістю деформації ( $\dot{\epsilon}_p$ ) та швидкістю переміщення дислокацій ( $v$ ) [8]:

$$\dot{\epsilon}_p = k \cdot b \cdot \rho_m \cdot v, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт,  $b$  – вектор Бюргерса.

За умови невиконання нерівності (4), коли  $\sigma_d \leq \sigma_i$  розблокування дислокацій відбудеться при рівнях напружень, нижчих за напруження ковзання кристалічної решітки. На підставі цього,

неоднорідний рух дислокацій в різних об'ємах зерна фериту приведе до порушення умови (5) і, як наслідок цього, деформація Людерса буде відсутня (відсутність на діаграмі деформації площадки плинності). З метою перевірки наведених положень розглянемо умови, коли  $\sigma_d = \sigma_i$ , а  $\sigma_d = k_y \cdot d^{-0.5}$  та розрахуємо критичне значення розміру зерна фериту ( $d_k$ ), більше якого смуги Чернова–Людерса не будуть формуватися. Після перетворень наведену величину можна оцінити:

$$d_k = (k_y \cdot \sigma_i^{-1})^2 \quad (6)$$

Після підстановки в (6) експериментальних значень,  $\sigma_i = 65$  МПа,  $k_y = 27,5$  Н·мм<sup>-1,5</sup> було визначено, що величина  $d_k$  має становити значення порядку 180 – 200 мкм. Як показано в [4], чим грубіша структура фериту, тим менша стає за довжиною площадка плинності та тим за нижчої густини накопичених дислокацій і високих параметрах деформаційного зміцнення починається область однорідного деформаційного зміцнення. З урахуванням того, що швидкість деформаційного зміцнення  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  пропорційна приросту густини рухомих дислокацій ( $\Delta\rho_m$ ) [5], можна

вважати, що із зростанням  $d$  за збільшенням  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  можна оцінювати і приріст загальної кількості дислокацій. З іншого боку, відомо [4], що високим швидкостям приросту дислокацій відповідає підвищена неоднорідність їх розподілу. Так, після будови залежностей деформацій Людерса та формування дислокаційної чарункової структури (розпад рівномірного розподілу в межах одного зерна на періодичну структуру) від розміру зерна фериту було визначено, що зникнення площадки плинності спостерігається при  $d$  більшому за 300 мкм [4]. На основі отриманих результатів можна із впевненістю вважати, що із зростанням  $d$  понад наведене значення відбувається перехід від рівномірного розподілу дислокацій [2, 4] або підтримки на необхідному рівні градієнта дислокацій у межах фронту зародку смуги деформації [8] до періодичних структур, які за зовнішніми ознаками подібні чарунковим структурам.

Розглянуті структурні перетворення при односпрямованому статичному навантаженні мають як спільні риси, так і відмінності при зміні знаку деформації. На рис. 1 наведено залежності межі плинності та  $\sigma_{-1}$  від розміру зерна фериту досліджуваної сталі. Можна спостерігати, що як  $\sigma_T$ , так і  $\sigma_{-1}$  достаньно однозначно описуються залежністю (1). Порівняльний аналіз абсолютних значень параметрів рівняння показує, що тільки для  $\sigma_i$  та  $\sigma'_i$  спостерігаються приблизно однакові значення, тоді як для  $k_y$  і  $k'_y$  розбіжність сягає до двох разів. На підставі цього можна вважати, що значення  $k'_y$  є величиною, яка дає змогу оцінити проникливість феритних границь розповсюдженню деформації при циклічному навантаженні не нижче ніж  $k_y$  для односпрямованого деформування. Підвищення ступеня пластичної деформації супроводжується зниженням  $k_y$ . Аналогічна за впливом дія спостерігається при збільшенні ступеня попередньої деформації при зміні знаку навантаження: величина  $k'_y$  знижується [2, 4]. Для величин  $\sigma_i$  та  $\sigma'_i$  поведінка дещо різна. Так, із зростанням ступеня деформації при односпрямованому навантаженні  $\sigma_i$  збільшується і може перебільшувати в декілька разів величину недеформованого стану. При реверсивному навантаженні, навпаки, величина  $\sigma'_i$  незалежно від ступеня попередньої деформації залишається практично незмінною [4]. Враховуючи, що при реверсивному деформуванні на початкових етапах навантаження дислокаційна структура визначатиме характер поведінки металу аж до моменту руйнування, визначимо граничні умови подібно тому, як це було зроблено для односпрямованого деформування. Для оцінки критичного розміру зерна фериту при знакозмінному циклічному навантаженні, який відповідає умовам розпаду рівномірного розподілу дислокацій на періодичні структури, було використано співвідношення (6). Після підстановки визначених із експерименту величин  $\sigma'_i = 90$  МПа,

$k'_y = 14 \text{ Н} \cdot \text{мм}^{-1.5}$  (рис. 1, б) було отримано значення  $d'_k \approx 24 - 25 \text{ мкм}$ , приблизно в 8 разів менше за аналогічну характеристику односпрямованого навантаження. Отриманий результат показує, що при односпрямованому навантаженні сталь з розміром зерна фериту 25 мкм має величину деформації Людерса 3,2 %, а умови розпаду рівномірного розподілу дислокацій далекі до досягнення, а для циклічного навантаження картина дещо інша. При циклічному деформуванні послідовна зміна етапів зміцнення та знеміцнення, за рахунок різниці в розвитку процесів анігіляції дислокацій в різних об'ємах зерна (поблизу границь та в середині), сприяють дуже швидкому перетворенню рівномірного розподілу дислокацій на періодичні структури.

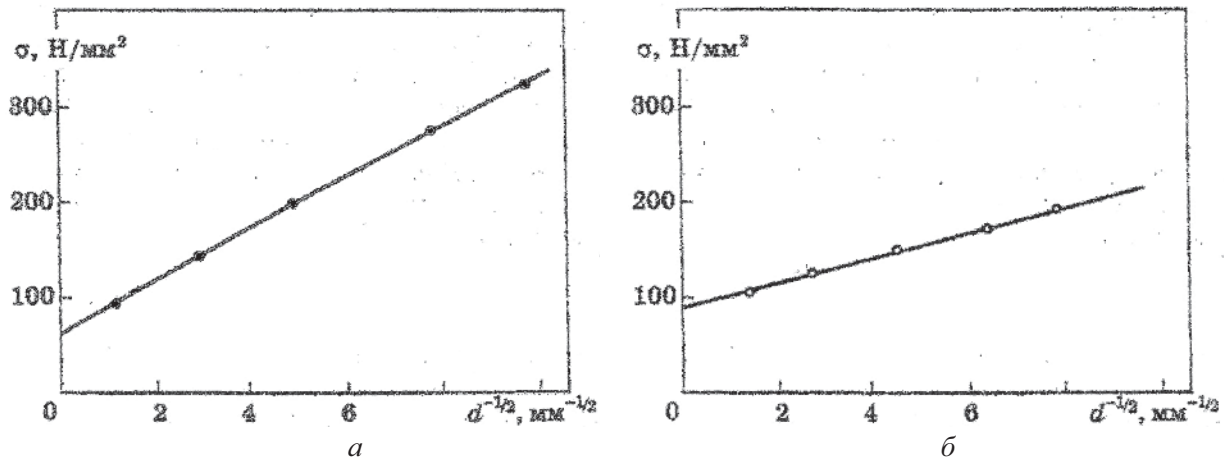


Рис. 1. Вплив розміру зерна фериту на  $\sigma_T$  при статичному розтягненні (а) та на  $\sigma_{-1}$  (б) низьковуглецевої сталі

Одне із підтверджень наведеного положення – це результати дослідження ступеня досконалості дислокаційної чарункової структури холоднотвореної низьковуглецевої сталі після знакозмінного навантаження (рис. 2). Так, після холодної пластичної деформації прокаткою на 20 % в сталі з 0,1 % С сформована недосконала дислокаційна чарункова структура фериту (рис. 2, а). Про це свідчать достатньо широкі субграниці, в яких відносно низька густина дислокацій та присутність незв'язаних дислокацій у тілі самих чарунок. Піддаючи холоднокатану сталь чотирьом циклам знакозмінного згину, досягають розвитку процесів досконалості чарунок. Про це свідчать результати структурних досліджень: зниження накопиченої кількості дислокацій, звуження субграниць та часткове очищення тіла чарунок від незв'язаних дислокацій (рис. 2, б).

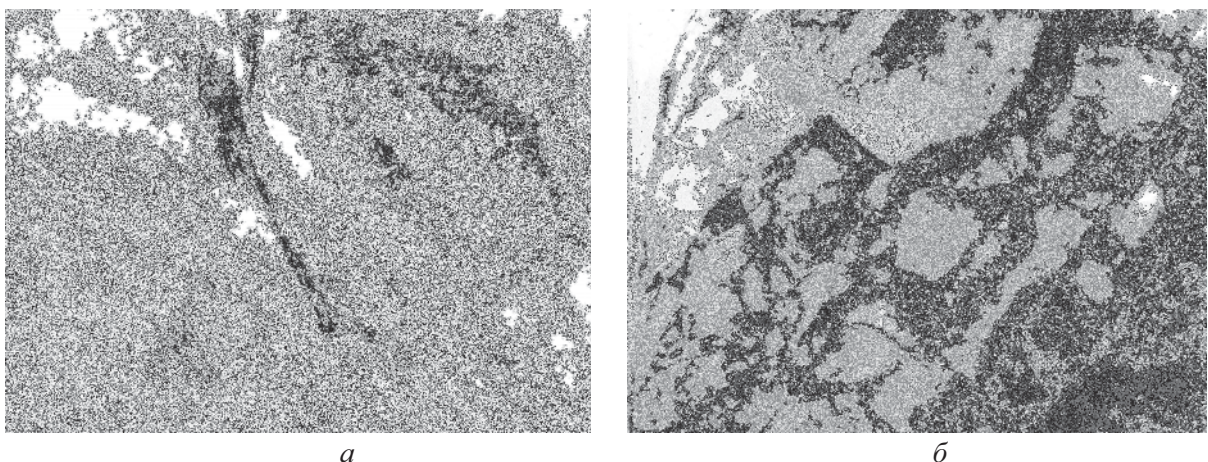


Рис. 2. Дислокаційна структура фериту низьковуглецевої сталі після 20 % пластичної деформації прокаткою (а) та після подальших чотирьох циклів знакозмінного згину (б). Збільшення 13000x1.5

Отже, одним із пояснень щодо складного механізму впливання розміру зерна фериту на поведінку металу при знакозмінному навантаженні є прискорення процесу розпаду однорідного розподілу дислокацій на періодичні структури з подальшою швидкою їх досконалістю.

**Висновки** 1. Зниження циклічної міцності низьковуглецевої сталі із збільшенням розміру зерна фериту обумовлено прискоренням процесів формування періодичних дислокаційних структур.

2. Виникнення осередків з неоднорідним розподілом дислокацій сприяє прискоренню процесів руйнування при циклічному навантаженні сталей з низьким вмістом вуглецю.

1. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1963. – 203 с.
2. Вакуленко И.А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2003. – 94 с.
3. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. – М.:Металлургиздат, 1958. – 267 с.
4. Вакуленко И.А., Большаков В.И. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали. – Днепропетровск: Маковецкий, 2008. – 196 с.
5. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
6. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів. – К.: Основа, 2005. – 324 с.
- 7.Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургиздат, 1958. –446 с.
8. Garofalo F. Factors affecting the propagation of a Luders band and lower yield stress in iron. *Met. Trans.* – 1971. – Vol. 2, № 8. – P. 2315–2317.