

УДК 691.87:691.714:539.434

**ОЦІНКА ВПЛИВУ ТВЕРДОРОЗЧИННОГО ЗМІЦНЕННЯ І МЕЖ ЗЕРЕН
ФЕРИТУ НА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ
НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ**

**І. О. Вакуленко, д. т. н., проф., О. О. Чайковський*, к. т. н., доц.,
Ю. Л. Надєждін**

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
ім. акад. В. Лазаряна*

**ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури»*

Постановка проблеми

За однакових умов навантаження для низько вуглецевих сталей стан твердого розчину і розмір зерна фериту мають адитивний вплив на процеси зародження і розповсюдження пластичної деформації [1]. Ступінь зміцнення металу, в залежності від схеми деформування, визначається розвитком процесів накопичення і перерозподілу дефектів внутрішньої будови [2]. Після досягнення певної пластичної деформації, виникає порушення балансу між приростом і розподілом дислокацій в фериті, приводе до формування періодичних дислокаційних структур. Враховуючи, що характер структурних змін в першу чергу визначається поведінкою металу на початкових етапах розповсюдження пластичної деформації [1; 2], схема навантаження буде суттєво впливати на характер зміцнення металу. Більше цього, співвідношення між впливом стану твердого розчину і велико куткових меж зерен на розповсюдження деформації може бути різним в залежності від схеми навантаження.

Мета роботи

Аналіз характеру поведінки низьковуглецевої сталі в залежності від розміру зерна фериту при односпрямованому статичному і циклічному навантаженнях.

Матеріал і методики досліджень

В якості матеріалу для досліджень була використана низьковуглецева сталь з 0,08 % вуглецю. Різний розмір зерна фериту отримували завдяки зміні ступеня холодної пластичної деформації і температури відпалу. Параметри деформаційного зміцнення і напруження необерненого руху дислокацій визначали з аналізу кривих розтягання, при швидкості деформації 10^{-3} с^{-1} . Циклічне навантаження здійснювали в умовах випробувальної машини «Сатурн-10» при знакозмінному вигині. Оцінку розміру зерна фериту проводили під світловим мікроскопом, з використанням методик кількісної металографії [3]. Вплив стану твердого розчину і розміру зерна фериту на межу плинності і міцність при втомі металу оцінювали використовуючи залежності типу Хола–Петча.

Викладення основного матеріалу.

Незалежно від об'ємної частки цементиту, вплив середнього розміру феритного прошарку в структурі вуглецевої або зерна фериту (d) в низьковуглецевій сталі, на напруження плинності підпорядковується залежності типу Хола–Петча [4]:

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

де σ_i – напруження тертя кристалічної решітки, k_y – величина опору меж зерен з великими кутами раз орієнтації розповсюдженню пластичної деформації. Експериментально доведене, що при напруженнях суттєво нижчих межі плинності, незалежно від структурного стану металу спостерігається необернений рух дислокацій. Наведене переміщення дислокацій приводить до їх накопичення в об'ємах зерен фериту поблизу з велико кутівими межами (рис. 1). Зазначені зміни внутрішньої будови сприяють підвищенню опору розповсюдження пластичної деформації. Незалежно від структурного стану металу, умов навантаження, величина підвищення межі плинності з високим коефіцієнтом кореляції підпорядковується співвідношенню (1) [2]. З іншого боку враховуючи, що межа зерна з великим кутом раз орієнтації виконує функції як місця зародження дислокацій, так і місця їх анігіляції [1], загальна їх довжина повинна мати відбиток на постійних характеристиках рівняння (1).

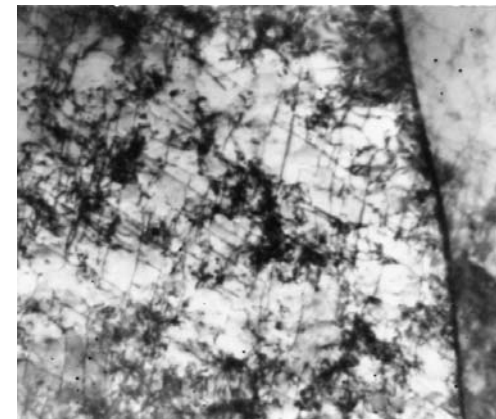


Рис. 1. Субструктура фериту сталі з 0,08 % С поблизу з межею зерна після пластичної деформації 1 %. Збільшення 20 000

Дійсно, використання співвідношення (1) для оцінки характеру впливу розміру зерна на поведінку металу при ступенях пластичної деформації значно перебільшуючи рівень межі плинності, став поштовхом для розробки альтернативної методики визначення параметрів рівняння (1) [5]. Здійснення екстраполяції ділянки однорідного деформаційного зміцнення кривої розтягання ($\sigma = \sigma_i' + K \varepsilon^m$) на нульову пластичну деформацію дозволяє визначити величини σ_i' і k_y' . Достатньо близькі абсолютні значення σ_i' і

σ_i привели до того, що тривалий час вказані характеристики вважалися однаковими. Аналогічні уявлення були розповсюджені на k'_y і k_y . Але в дійсності величини σ'_i і k'_y являються залежними від розміру зерна металу і не можуть ототожнюватися з постійними (σ_i і k_y) рівняння (1). На основі чисельних експериментальних досліджень було доведено, що незалежно від температури навантаження, швидкості деформації величину σ'_i можна оцінити за співвідношенням [2]:

$$\sigma'_i = \sigma_i + \frac{k_y}{\sqrt{2d}} + \alpha\mu b\sqrt{\rho_m}, \quad (2)$$

де α – постійна, μ – модуль зсуву, b – вектор Бюргерса, ρ_m – густина рухомих дислокацій. Для низьковуглецевих сталей, на початкових етапах розповсюдження пластичної деформації густина рухомих дислокацій може бути оцінена за залежністю [6]:

$$\rho_m = \frac{\varepsilon_L}{bd}, \quad (3)$$

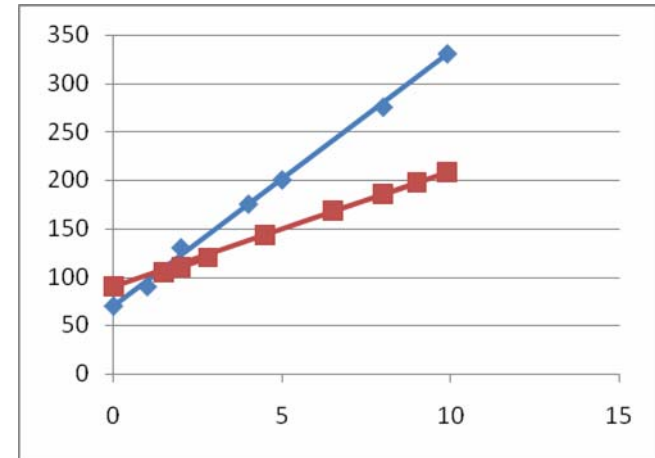
де ε_L – деформація Людерса. Використання (3) дозволяє оцінити роздільний внесок в розвиток початкових етапів пластичної деформації від стану твердого розчину, впливу великокутових меж зерен і густини рухомих дислокацій.

Формування зародка смуги деформації передбачає виникнення певного розподілу рухомих дислокацій, за умов [5]:

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

де σ_d – напруження розблокування дислокацій. За співвідношенням (4) формування зародка смуги деформації стає можливим лише завдяки низькому напруженню тертя кристалічної решітки. З іншого боку, розповсюдження ковзання дислокацій через межу зерна приведе до порушення умови (4). Недостатній рівень накопичення рухомих дислокацій приведе до відсутності ділянки переривчастої течії на діаграмі деформації [2]. Враховуючи залежність ρ_m від d (4) слід вважати, що повинен існувати деякий розмір зерна (d_1) більше якого вказана ділянка на діаграмі деформації буде відсутня. За умов статичного розтягання розмір зерна фериту (коли $\sigma_d \approx \sigma_i$) (крива 1, рис. 2) буде дорівнювати приблизно 250–300 мкм, що узгоджується з відомими результатами експериментальних досліджень [7].

$\sigma_T, \sigma_{-1}, \text{МПа}$



$d^{\frac{1}{2}}, \text{мм}^{-\frac{1}{2}}$

Рис. 2. Вплив розміру зерна фериту на σ_T (◆-1) і σ_{-1} (■-2)

На підставі цього слід вважати, що при розмірах зерна фериту більше як 250 мкм величина напруження плинності буде визначатися в більший ступені станом твердого розчину, при практичній відсутності впливу від меж зерен. При $d \geq d_1$ σ_T буде дорівнювати σ'_i . З врахуванням співвідношень (1) і (2), при $\alpha \approx 0,3$ отримаємо $\sigma_d \approx \mu b \sqrt{\rho_m}$, а умова (4) буде мати вигляд:

$$\rho_m \succ \left[\frac{\sigma_i}{\mu b} \right]^2. \quad (5)$$

Після підстановки в (5) $\sigma_i = 70$ МПа (рис. 2), відомих значень μ і b для фериту визначили, що мінімальні значення ρ_m для початку пластичної деформації повинні складати значення не менш як 10^7 мм^{-2} . Порівняння з відомими результатами досліджень показує добрий збіг з аналогічною характеристикою низьковуглецевої сталі ($6 - 9 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$) [8].

Аналіз характеру залежності міцності при втомі (σ_{-1}) від розміру зерна фериту залишається незмінним в порівнянні з статичним навантаженням:

$$\sigma_{-1} = \sigma_i'' + k_y'' d^{-\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

де σ_i'' і k_y'' – аналогічні характеристики як за (1). За залежністю (2) (рис.2) були вираховані σ_i'' і k_y'' , які дорівнювали 90 МПа і $1,1 \frac{к2}{мм}^{1,5}$ відповідно. Більше цього, було визначене, що $\sigma_i'' > \sigma_i$, а $k_y'' < k_y$. Після оцінки критичного розміру зерна фериту (d_2), коли $\sigma_i'' \approx k_y'' \cdot d_2^{-\frac{1}{2}}$ (рис.2)

визначили, що $d_2 = 20$ мкм, а необхідна кількість рухомих дислокацій для підтримки умов циклічного навантаження приблизно в два рази більша і складає значення $2 \cdot 10^7 \text{ мм}^{-2}$. Таким чином, при циклічному навантаженні стан твердого розчину в розповсюдженні течії має значно вагоме значення в порівнянні з односпрямованим статичним деформуванням. При розмірах зерна фериту лише менше як 20 мкм, починає перевищувати ефект зміцнення від присутності велико куткових меж зерен.

Дослідженнями внутрішньої будови металу при циклічному навантаженні визначено, що при низьких амплітудах формується дислокаційна структура, яка подібна витягнутим стінкам з переважним орієнтуванням у напрямку до велико куткових меж зерен [9]. З іншого боку, значно меншим деформаціям за цикл (в порівнянні з деформацією при розтяганні) відповідають цілком обґрунтовано і малі відстані переміщення дислокацій в фериті. Різний спектр відстаней вільного пробігу дислокацій, вказує на можливість розвитку процесів динамічного деформаційного старіння при циклічному навантаженні. Якщо це так, тоді стає зрозумілим за рахунок яких чинників виконуються умови: $\sigma_i'' > \sigma_i$, а $k_y'' < k_y$.

У загальному вигляді тривалість часу (τ_0), якого необхідно для взаємодії дислокації з атомами домішок (час очікування) при розвитку процесів динамічного деформаційного старіння (ДДС), можна оцінити:

$$\tau_0 = \frac{\rho_m \cdot l \cdot b}{\dot{\varepsilon}}, \quad (7)$$

де $\dot{\varepsilon}, l$ – відповідно макроскопічна швидкість деформації і довжина вільного пробігу дислокації. Друга характеристика – час вільного пробігу дислокації до моменту взаємодії з атомами домішок (τ_1) визначається за співвідношенням:

$$\tau_1 = \frac{l}{\dot{\varepsilon}_1}, \quad (8)$$

де $\dot{\epsilon}_1$ – швидкість переміщення дислокації. Максимальний ефект відрозвитку процесів ДДС буде при $\tau_0 \approx \tau_1$ [2]. Після підстановки в (7) для циклічного навантаження $\rho_m = 2 \cdot 10^7 \text{ мм}^{-2}$, замість $l = d_1 = 20 \text{ мкм}$ і $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$ (макроскопічна швидкість деформації при випробуваннях в умовах машини «Сатурн-10») отримаємо, що τ_0 дорівнює приблизно 10^{-2} с .

Для оцінки τ_1 за (8) визначимо спочатку $\dot{\epsilon}_1$ за рівнянням [6]:

$$\dot{\epsilon} = k \rho_m b \dot{\epsilon}_1, \quad (9)$$

де k – геометричний фактор. Після підстановки характеристик в (9) при $k \approx 1$ і визначення $\dot{\epsilon}_1$ за умов коли $l = d_1$, τ_1 буде складати значення поблизу 10^{-2} с . Таким чином, на перших етапах циклічного навантаження, коли практично відсутня фрагментація зерна, дуже велика вірогідність розвитку ДДС, що підтверджується для аналогічної сталі результатами експериментальних досліджень [9]. Дійсно, в процесі циклічного навантаження дуже велика локалізація рухомих дислокацій вже на початкових етапах приведе до їх взаємного блокування, в наслідок чого повинне відбутися зменшення величини ρ_m , а розділення зерна фериту на окремі фрагменти приведе до скорочення l в декілька разів. На підставі цього, порушення умов розвитку ДДС в одному мікрооб'ємі металу може бути початком їх виконання в іншому. Таким чином, для низьковуглецевої сталі послідовний розвиток процесів ДДС при циклічному навантаженні в різних мікрооб'ємах може бути однією з можливих причин підвищеної ролі твердо розчинного зміцнення в порівнянні зі статичним односпрямованим деформуванням.

ВИСНОВКИ

1. Для низьковуглецевої сталі при циклічному навантаженні ефект зміцнення від стану твердого розчину перевищує вплив меж зерна в порівнянні зі статичним односпрямованим деформуванням.
2. Підвищена роль твердо розчинного зміцнення при циклічному навантаженні низько вуглецевої сталі з визначеною вірогідністю обумовлена розвитком процесів динамічного деформаційного старіння.

Література

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. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.

3. Вакуленко І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дн-ськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
4. Hall E. O. The deformation and ageing of mild steel / E. O. Hall // III Discuss. Proc. Phys. Soc. 1951, B-64, part. 9, p.747–753.
5. Cottrell A. H. Theory of brittlefracture in steel and similar metals / A. H. Cottrell // Trans. Met. Soc. AIME, 1958, v. 212, p. 192–209.
6. Garofalo F. Factor saffecting the propagation of a Luders bandand lower yield stress in iron / F. Garofalo // Met. Trans. 1971, v. 2, № 8, p. 2315–2317.
7. Imamura J. Contribution of local strain rate at Luders band front to grain size dependence of lower yield stress in iron / J. Imamura, H. Hayakawa, T. Taoka // Trans. Iron and Stell Inst. Japan, 1971, v. 11, p. 191–200.
8. Igata N. Direct observation of hardening processes of polycrystalline iron / N. Igata, S. Seto // Proc. Int. Conf. Sci. and Technol. iron and steel. Tokyo, 1970, part 2, p. 1293–1297.
9. Pickard S. M. Strain-ageing behavior of fatigued Fe–N–C alloys / S. M. Pickard, F. Guin // Acta Met., 1990, v. 38, p. 397–401.

УДК 691.87:691.714:539.434

Оцінка впливу твердорозчинного зміцнення і меж зерен фериту на розповсюдження деформації в низьковуглецевій сталі / І. О. Вакуленко, О. О. Чайковський, Ю. Л. Надєдін // *Металознавство та термічна обробка металів : науков. та інформ. журнал* / Д : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 4. – С. –. – Рис. 2. – Бібліогр. : (9 назв.)

Для низкоуглеродистой стали осуществлен анализ раздельного влияния твердо растворного упрочнения и размера зерна феррита на поведение при статическом и циклическом нагружениях. Рассмотрена возможность развития процессов динамического деформационного старения при циклическом нагружении.

Для низкоуглецевой стали здійснений аналіз роздільного впливу твердо розчинного зміцнення і розміру зерна фериту на поведінку при статичному і циклічному навантаженні. Розглянута можливість розвитку процесів динамічного деформаційного старіння при циклічному навантаженні.

For low-carbon steel the analysis of separate influence the hardening of solid solution and size of grain ferriet is carried out on a conduct at static and cyclic loadening. Possibility of development of processes of dynamic deformation ageing is considered at a cyclic loadening.