

## О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА РАСКРЫТИЕ ТРЕЩИНЫ В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

**И.А. Вакуленко, профессор, зав. кафедрой Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта,  
В.Г. Раздобреев, ст. научн. сотр. Института черной металлургии НАН Украины,  
Н.Н. Грищенко, ст. преподаватель кафедры Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта.**

*Аннотация:* Формирование хрупкой трещины разделяют на два процесса – зарождение от высокой локализации пластического течения и рост трещины в поле напряжений.

*Ключевые слова:* трещина, феррит, напряжение, размер зерна.

Процесс формирования трещины можно условно разделить на два этапа: это возникновение высокого локального напряжения от неоднородного распределения пластической деформации и последующий рост зародившейся трещины. Определенная степень и локализация пластического течения, предшествующие зарождению трещины, предполагают влияние процессов деформационного упрочнения на характер развития указанного явления.

Целью работы явилось описание процесса раскрытия трещины в зависимости от параметров деформационного упрочнения углеродистой стали.

Материалом для исследования явились углеродистые стали с глобулярным цементитом, объемная доля ( $f$ ) которого изменялась от 0,034 до 0,11. Структуру сталей, представляющую полиэдрические зерна феррита с расположенными на границах глобулами цементита, получали после закалки от температур аустенитизации, отпуска 680 °С, деформации 17-80 % и отжига 680 °С. Структурные параметры сталей определяли с использованием методик количественной металлографии. Характеристики деформационного упрочнения и свойства сталей определяли из анализа кривой растяжения. Скорость деформации составляла  $10^{-2} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , при температурах от +20 до -100 °С.

Из совместного рассмотрения условий преодоления растущей трещиной границы зерна металла и процессов, приводящих к разрушению металла (равенство поверхностной энергии работе затраченной на смещение определенного количества дислокаций при формировании трещины) получено соотношение для критического раскрытия трещины ( $\delta_{кр}$ ) [2]:

$$\frac{\delta_{кр}}{d} = \frac{\sigma_T}{\sigma_B} \cdot \frac{k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}}}{\mu} \quad (1)$$

где  $d$  - размер зерна феррита,  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  - соответственно пределы текучести и прочности,  $\mu$  - модуль сдвига,  $k_y$  - угловой коэффициент уравнения Холла – Петча [1]. Отсутствие, в явном виде, влияния объемной доли цементита на процессы формирования трещины, в действительности учитывается через  $d$ . Из анализа соотношения (1) следует, что с увеличением размера зерна феррита, отношение  $\frac{\delta_{кр}}{d}$  уменьшается. Это свидетельствует о снижении сопротивляемости стали процессам распространения трещины. Вместе с этим, при неизменном  $d$ , увеличение объемной доли цементита, приводя к росту параметров деформационного упрочнения [3], может расцениваться как дополнительный фактор, стабилизирующий процесс течения стали.

Рассматривая скорость деформационного упрочнения  $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)$  как один из параметров, характеризующих способность металла к деформационному упрочнению [1], из уравнения кривой растяжения:

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

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  - соответственно истинные напряжение и деформация,  $\sigma_0$  - напряжение микротекучести [3],  $k$  - постоянная,  $m$  - показатель степени, получаем зависимость:

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

На основании разработанной методики определения параметров уравнения Холла-Петча (анализ кривой растяжения [1]), для области деформаций вблизи предела текучести можно записать:

$$\sigma - \sigma_0 = k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

При ускорении роста трещины, когда  $\sigma_T \rightarrow \sigma_B$  [2], после подстановки (4) в (1), получаем:

$$\frac{\delta_{\kappa}}{d} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{m \cdot \mu} \quad (5)$$

Для начальных этапов деформирования, в результате частного решения уравнения Гиббса получено соотношение, позволяющее оценить энергию активации пластического течения [4]:

$$\Delta H = -R \cdot \frac{\Delta \ln \varepsilon}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)} \Big|_{\sigma} \quad (6)$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - температура,  $^{\circ}\text{K}$ ,  $\varepsilon$  - скорость деформации.

Зависимость  $\Delta H$  от  $d$  и  $f$  сталей приведена на рис. 1.

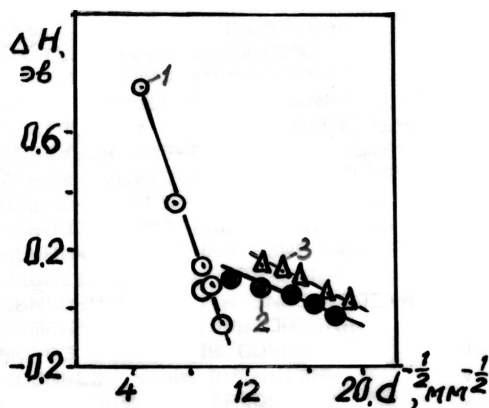


Рис. 1. Влияние объемной доли цементита в стали (1-0,034, 2-0,09, 3-0,11) и размера зерна на  $\Delta H$ .

С уменьшением размера зерна феррита, энергия активации пластического течения снижается. При одинаковом  $d$  увеличение  $f$  сопровождается приростом  $\Delta H$ . Однако, учитывая прирост параметров деформационного упрочнения с увеличением объемной доли цементита в стали, возникает уверенность в существовании взаимосвязи между  $\Delta H$  и  $m$ . Действительно, в результате нанесения парных значений указанных характеристик друг против друга, обнаруживается однозначная прямопропорциональная зависимость (рис. 2). На основании соотношения (6) и результатов, приведенных на рис. 2, можно (5) представить в виде:

$$\frac{\delta_{\kappa}}{d} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon \cdot A}{\Delta H \cdot \mu} \quad (7)$$

где  $A$  - постоянная.

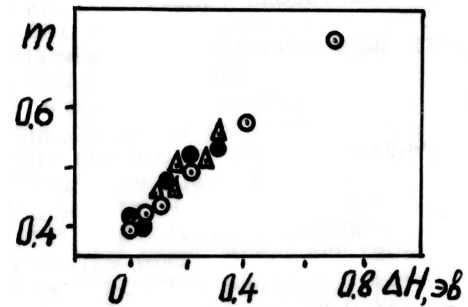


Рис. 2. Взаимное изменение  $m$  и  $\Delta H$ .  
Обозначения те же, что и на рис. 1.

На основании зависимости (7) процесс раскрытия трещины представляется как состоящий, по крайней мере, из двух составляющих, которым присущи признаки пластически нестабильного течения (когда возникающая первая полоса Чернова – Людерса приводит к разрушению металла) и деформационно упрочняющегося материала. Рост сформированной трещины будет продолжаться до тех пор, пока наступившее деформационное упрочнение не приведет к повышению результирующего напряжения в устье трещины, которое металл способен выдержать до разрушения. В случае низких значений  $\Delta H$  и, как следствие этого, высоких степеней локализации пластического течения, когда необходимый прирост напряжения не обеспечивается параметрами деформационного упрочнения, происходит ускорение процесса раскрытия трещины, металл разрушается после исчерпания резервов деформационного упрочнения. Однако, учитывая, что для каждого значения  $f$  существует определенная величина размера зерна феррита ( $d_0$ ), меньше которой в стали происходит резкое (в несколько раз) снижение пластичности, а  $f \approx \frac{1}{d_0}$ , то с ростом  $f$  и снижением  $d_0$  должно повыситься  $\varepsilon$ . Действительно, при измельчении зерна феррита низкоуглеродистой стали до 2 мкм удлинение составило практически нулевые значения [5]. В то же время как в стали с  $f=0,11$  и примерно одинаковым  $d$ , удлинение достигло порядка 10 % [6]. Таким образом, для одинакового размера зерна феррита, увеличение объемной доли цементита, приводя к росту параметров деформационного упрочнения и  $\Delta H$ , способствует приросту  $\varepsilon$  - деформации начала раскрытия трещины. Вследствие этого  $\frac{\delta_{\kappa}}{d}$

растет, что адекватно увеличению угла в устье трещины [2].

#### Литература

1. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. – К.: Наукова думка, 1972. -231с.
2. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. -256с,
3. Бабич В.К., Пирогов В.А., Вакуленко И.А. Об определении параметров упрочнения стали//Заводская лаборатория. 1976. -№ 10. –С.1246-1248.
4. Conrad Н., Wiedersich Н. Activation energy for deformation of metals at low temperatures//Acta met. 1960. v.8.№2.-Р.128-130.
5. Моррисон В.Б., Миллер Р.Л. Пластичность сплавов со сверхмелким зерном.//В кн. Сверхмелкое зерно в металлах.- М.:Металлургия, 1972. С.184-205.
6. Вакуленко И.А., Пирогов В.А., Бабич В.К. К вопросу об оценке пластически нестабильного течения в стали//Проблемы прочности. 1989. №7. –С.24-26.

Рецензент В.В. Парусов, профессор,

д.т.н.

Зав. отделом ИЧМ НАНУ